

PEUT-ON COMPRENDRE *SIMPLEMENT* LE BOSON DE HIGGS ? Un survol historique de la physique des interactions nucléaires faibles

Le 4 juillet 2012 le CERN annonçait la découverte d'une particule nouvelle qui semble bien pouvoir être le *boson de Higgs* recherché depuis plus de 40 ans. L'exploit expérimental est considérable : le LHC (Large Hadron Collider), est un collisionneur de protons qui circulent dans un tunnel de 27km de circonférence avant d'entrer en collision après avoir atteint une vitesse qui ne diffère de celle de la lumière que de moins d'un milliardième. C'est sans aucun doute l'instrument le plus complexe jamais réalisé par l'homme. Il y a quatre zones d'intersection où sont installés les détecteurs : deux d'entre eux ATLAS et CMS sont dédiés aux tentatives de détection de cette particule, des chefs-d'oeuvre d'électronique grands comme des cathédrales. Plusieurs milliers de physiciens auront contribué à cette expérience. Chaque collision donne lieu à la production de centaines de particules et c'est par un léger accroissement de la production de certaines d'entre elles que l'on peut affirmer que celle que l'on attend a été produite car aussitôt née celle-ci s'est désintégrée, sa durée de vie étant inférieure à 10^{-22} seconde. Les équipes des deux détecteurs ont donc décelé toutes deux des anomalies dans le comptage des particules produites qui ne laissent plus de doute sur l'existence d'une particule nouvelle, environ 134 fois plus massive que le proton.

Peut-on comprendre pourquoi la découverte de cette particule, s'il s'agit bien de celle qui était attendue depuis si longtemps (il faudra des expériences complémentaires sur son spin et sa parité pour le confirmer), est importante ? C'est un effet quantique qui repose sur la notion de *brisure spontanée de*

symétrie et il est bien difficile de comprendre le mécanisme qui a conduit à sa prédiction sans faire de calculs. Nous allons donc plutôt situer le développement historique qui concerne la théorie des *interactions nucléaires faibles*, puisque ces recherches sont nées de crises théoriques successives qui remontent loin dans le passé.

Peu de temps après la découverte de la radioactivité par Becquerel en 1896 et les premières études de Marie et Pierre Curie et de Rutherford, on distingue les rayons *alpha* arrêtés par une mince feuille de papier, et les rayons *beta* beaucoup plus pénétrants et déviés par les champs magnétiques. Très vite ils s'aperçoivent que de nombreux corps ou isotopes des corps usuels émettent des électrons, car ce « rayonnement » *beta* n'est autre que l'émission d'électrons par des noyaux radioactifs.

Mais une première crise théorique naît de cette découverte. En effet les électrons émis par un noyau donné devraient tous emporter la même énergie cinétique, or c'est un spectre d'énergie que l'on observe : la conservation de l'énergie semble battue en brèche et le problème va solliciter tous les physiciens du premier quart du 20^e siècle, Marie Curie, Einstein et bien d'autres, de sorte que des doutes s'élèvent sur la validité de la loi de conservation de l'énergie, un des piliers de la physique (cela conduira même N. Bohr à se demander si l'énergie ne serait conservée qu'en moyenne). Mais la crise s'approfondit et, s'apercevant que même l'isotropie de l'espace est remise en question (c'est-à-dire l'invariance par rotation), Wolfgang Pauli postule en 1930 que l'émission de l'électron est accompagnée d'une particule hypothétique, électriquement neutre, beaucoup plus légère que l'électron (voire même de masse nulle comme le photon) que

Fermi baptisera *neutrino* (restituant grâce à cette hypothèse la conservation de l'énergie et l'invariance par rotation). [Le neutrino ne sera découvert expérimentalement qu'en 1956 alors que le scepticisme entourant son existence éventuelle allait croissant ; exemple, citation extraite de l'excellent livre de Richtmeyer en 1955 : *The neutrino is the least satisfactory of all the particles of nuclear physics, and its lamentable intransigence has caused many physicists to question whether it is in fact anything more than a name to conceal our ignorance*].

En 1932 Chadwick découvre le neutron, la deuxième particule constitutive des noyaux d'atome, à côté du proton ; c'est une particule très semblable au proton du point de vue des interactions nucléaires, de masse très légèrement supérieure, à cela près qu'il est dépourvu de charge électrique. Mais, contrairement au proton, le neutron est instable, sa vie moyenne n'est que d'un petit quart d'heure, et il se désintègre en un proton, un électron et un neutrino.

La radioactivité *beta* est donc due à l'instabilité des neutrons dans les noyaux possédant un excès de neutrons (en revanche si ce nombre n'est pas grand les neutrons ne peuvent plus se désintégrer car les états de protons sont occupés et ils ne peuvent pas en accommoder un de plus). On voit donc que la radioactivité *beta* n'est pas un simple détail. **L'interaction nucléaire forte** lie entre eux les neutrons et les protons dans les noyaux, mais malgré l'intensité de cette interaction il n'existe que quelques centaines de noyaux de durée de vie supérieure à une fraction de seconde. Si le nombre de protons est trop grand la répulsion entre charges électriques de même signe finit par l'emporter sur l'attraction nucléaire ; si le nombre de neutrons est trop grand ils se désintègrent par

radioactivité *beta* : sans **l'interaction nucléaire faible** il y aurait donc des noyaux arbitrairement gros, composés de myriades de neutrons

Dès 1935 Enrico Fermi fait la théorie de cette désintégration. Il fait l'hypothèse que les trois particules émises lorsque le neutron se désintègre, le proton, l'électron et le neutrino, sont produites simultanément et au même point. Cette théorie va permettre de rendre compte pendant très longtemps de toutes les expériences relatives aux interactions nucléaires faibles. Mais très vite les théoriciens vont réaliser que cette théorie est pathologique : à plus haute énergie que celles où sont conduites les expériences de cette période, elle prédit des probabilités supérieures à 100%. Dans le jargon des physiciens la théorie n'est pas renormalisable, c'est-à-dire qu'elle n'est pas compatible avec la mécanique quantique. Cette crise va durer pendant plus de 30 ans.

Les années de l'après seconde guerre mondiale, voient le succès d'une théorie a priori totalement disconnectée des problèmes nucléaires, celle de l'électrodynamique quantique: l'électromagnétisme du 19^e siècle est reformulé dans un cadre qui incorpore la mécanique quantique et la relativité (travaux de Feynman, Schwinger et Tomonaga). Entre temps le mathématicien H. Weyl a montré que le cadre quantique permettait de "reconstruire" tout l'électromagnétisme, les lois de Coulomb, Ampère, Faraday, Maxwell, par un simple principe de symétrie locale (ou symétrie de jauge). Dans cette théorie quantique de l'électromagnétisme l'interaction entre particules chargées est due à l'échange de *photons*, ces particules duales des champs électromagnétiques qu'avait introduit A. Einstein. La masse nulle des photons, qui fait que leur vitesse est toujours la même quel que soit l'état de

mouvement des observateurs, a aussi pour conséquence qu'ils peuvent transmettre l'interaction entre particules chargées à très grande distance : on parle de portée infinie.

Dès 1960, à la suite de S.Glashow, les théoriciens vont essayer de reproduire le mécanisme qui avait fait le succès de l'électromagnétisme ; c'est ainsi qu'un neutron émettrait un 'médiateur' des forces faibles, un analogue du photon. Le neutron se transformerait ainsi en proton (le médiateur W^- doit donc emporter une charge négative). Ce médiateur W transporte l'interaction faible puis produit l'électron et le neutrino. Certes il est possible d'imiter la stratégie de l'électromagnétisme, c'est-à-dire d'imaginer une symétrie locale dont les vecteurs seraient W^- , un W^+ de même masse et de charge opposée et un médiateur neutre Z . Mais une contradiction se présente immédiatement :

- ou bien ces particules médiatrices sont sans masse comme le photon ; la théorie est alors bien cohérente... mais la portée des interactions faibles devrait être très grande, alors qu'elle est extrêmement faible.
- ou bien elles sont massives, et l'interaction est bien de courte portée...mais on retrouve l'incohérence quantique de la théorie de Fermi

En 1964 R.Brout et F.Englert à Bruxelles, P. Higgs à Edinbourg empruntent un mécanisme qui a fait ses preuves dans la théorie de la supraconductivité : une *transition de phase* d'un champ supplémentaire (un "boson") couplé à ces Z et W . Leur propagation lorsque ces particules baignent dans cette nouvelle phase, devient massive. Peut-être dans une phase initiale très chaude dans les premiers instants qui suivaient le big bang, ces W^\pm et Z étaient-ils de masse nulle comme les photons ; mais la température diminuant une

symétrie brisée donne naissance à ces bosons de Brout-Englert-Higgs (c'est l'analogie de la condensation des paires d'électrons, qui constituent un boson, dans un supraconducteur). En présence de ces bosons la propagation des W^\pm et Z ne se produit plus que sur une très courte distance.

En 1967 S. Weinberg et A. Salam indépendamment, incorporent ce mécanisme dans une théorie de jauge, suivant l'idée de Glashow, (groupe de symétrie $SU(2) \times U(1)$) qui englobe et *unifie* les interactions faibles et électromagnétiques. En plus du photon qui reste de masse nulle, trois autres médiateurs devenus massifs en se propageant dans un bain de bosons de Higgs sont requis. Cette construction était extrêmement audacieuse pour plusieurs raisons ; d'abord il fallut attendre quelques années et des progrès techniques de la *théorie des champs* pour affirmer la validité potentielle de cette théorie. De plus elle reposait sur une unification entre des interactions *a priori* sans rapport, tout aussi surprenante et magnifique que la synthèse plus d'un siècle auparavant par JC Maxwell de l'électricité et du magnétisme.

En 1973 la cohérence quantique de cette construction fût démontrée par G. 't Hooft et M. Veltman.

Ces médiateurs des interactions électro-faibles furent effectivement découverts au CERN dans les années 1980, au LEP, l'accélérateur qui précéda le LHC. Ils sont environ 100 fois plus lourds que le proton (et ont une durée de vie de l'ordre de 10^{-24} sec.).

Il ne restait plus que le boson de Brout-Englert-Higgs pour que toute cette construction soit validée. La particule

découverte cette année au CERN est évidemment un candidat très sérieux, mais il faudra des expériences complémentaires pour s'en assurer. A ce stade les physiciens ont quand même très largement le sentiment que le fameux boson a été découvert.

Quelques remarques complémentaires sur cette découverte :

- Les journaux du monde entier ont fait leur une sur cette découverte mais nombre d'entre eux ont utilisé l'appellation de *particule de Dieu*. C'est évidemment une présentation désastreuse et bien des gens se sont demandé si les physiciens avaient perdu la tête. J'imaginai déjà avec effroi le pèlerinage du CERN pour célébrer cette manifestation du divin ! L'honnêteté m'oblige à dire que ce ne sont pas tant les journalistes qu'il faut blâmer que des collègues physiciens qui ont trouvé spirituel ou accrocheur d'utiliser ce terme. Leon Lederman, prix Nobel de physique, semble être l'inventeur de ce nom puisqu'en 1993 il a publié un ouvrage de vulgarisation intitulé *The God particle : if the Universe is the Answer, What is the Question ?* (qu'il avait projeté initialement d'appeler *The Goddamn particle* puisqu'elle avait échappé à tant d'efforts expérimentaux). Je crois que tous les scientifiques devraient éviter des pratiques comme celle-là qui jettent le trouble dans l'esprit du public.
- Plusieurs articles ont insisté sur le coût important des recherches qui ont permis de mettre cette nouvelle particule en évidence. Je ne vais pas essayer ici de reprendre le discours sur les progrès technologiques (aimants supraconducteurs, traitement en grille du flot d'informations, etc) qui accompagnent cette prouesse expérimentale. Je vais simplement rappeler la phrase

célèbre de Robert Wilson le concepteur de ‘Fermi lab’ dans la banlieue de Chicago, qui fut le plus grand accélérateur jusqu’à l’arrivée du LHC. Avant que sa construction ne soit approuvée par le Congrès, il fut entendu dans les années soixante par une commission sénatoriale qui s’émouvait du prix de la machine. Après qu’il eut développé la grandeur « culturelle » d’un tel projet, un sénateur lui demanda quel serait l’impact de cette machine sur la défense des Etats-Unis et le professeur Wilson répondit “ *It has nothing to do directly with defending our country except to help make it worth defending* “.

- Enfin, puisque le modèle standard qui incorpore les trois interactions électromagnétiques, nucléaires fortes et faibles, a été validé jusqu’à présent avec une grande précision par toutes les expériences les concernant, peut-on penser que nous sommes au bout du chemin? En réalité il n’en est rien. La situation d’aujourd’hui ressemble un peu à celle qui suivit la théorie de Fermi des interactions faibles en 1935: ce modèle standard est parfaitement cohérent aux énergies qui ont été accessibles jusqu’à présent, mais ses propriétés impliquent qu’à plus haute énergie encore, ou de manière équivalente si l’on sonde encore plus finement la matière jusqu’à des distances plus courtes, sa validité ne peut pas indéfiniment se prolonger. On sait bien que les idées présentes sur une théorie de la gravitation qui incorporerait la relativité générale d’Einstein et serait compatible avec la mécanique quantique, n’ont pas reçu la moindre validation expérimentale. Mais faudra-t-il attendre d’avoir compris la gravitation (c’est-à-dire encore de longues années) pour savoir ce qui cache au-delà du modèle standard, la question est ouverte !

